第 41 卷 第 2 期 天 文 学 进 展 Vol. 41, No. 2
2023 年 6 月 PROGRESS IN ASTRONOMY Jun., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.02.05

中国空间站望远镜 (CSST) 密集星场天体自行研究

聂嘉潞[1,2]，曹子皇[1,2]，刘 超[2,3]，田海俊[4]，田 浩[3]，
张 鑫[3]，韦成亮[5]，李晓波[6,7]，班 章[6,7]，赵永恒[1,2]

(1. 中国科学院 国家天文台 光学天文重点实验室，北京 100012； 2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院 国家天文台 空间站望远镜科学应用研究中心，北京 100012； 4. 杭州电子科技大学，杭州
310018； 5. 中国科学院 紫金山天文台 星系宇宙学和暗能量研究重点实验室，南京 210033； 6. 中国科学院
长春光学精密机械与物理研究所，长春 130033； 7. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 空间光学系
统在轨制造与集成重点实验室，长春 130033)

摘要： 对密集星场自行研究是天体测量领域的难题之一，深刻地影响着相关领域的发展。空间观测对于研究密集星场的优势十分明显。CSST 可以提供高精度绝对自行，弥补 HST 在观测覆盖范围以及 Gaia 在暗弱星等方面的不足。银河系核球区作为典型的密集星场天区，具备很强科学价值，但数据处理方面面临很大挑战。以银河系核球区为例，验证了绝对自行处理方法，并对 CSST 密集星场的观测策略提出建议。基于 CSST 核球区仿真观测图像，开展数据处理方法的研究和验证。使用两种定心方法并进行比较，定心精度可达近 $0.03 \sim 0.08$ pixel。以 10 a 为基线长度，对比了不同观测方法下所得到绝对自行的精度，发现等间隔观测的策略最优。基于此方法，得出结论：对于 $18 \sim 24$ mag 的恒星，通过 6 次观测，可以得到好于 0.2 mas/a 的绝对自行精度。最后，估计了不同时间基线和恒星速度下视差对自行的影响。

关 键 词： 密集星场；空间天文观测；银河系；自行

中图分类号： P126, P144.6 **文献标识码：** A

1 引 言

作为中国载人空间站计划中最重要的设施之一，中国空间站巡天望远镜 (Chinese Space Station Telescope, CSST) 是一台 2 m 级的空间巡天望远镜，计划进行为期 10 a 的多色测光和无狭缝光谱测量。该巡天的科学目标包括宇宙学、数十亿个星系和等数量的单个恒星

收稿日期： 2022-04-16； **修回日期：** 2022-04-25

资助项目： 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究 (CMS-CSST-2021-A08)；LAMOST 人工智能远程观测辅助系统研究 (12073047)；湖北省杰出青年基金 (2019CFA087)

通讯作者： 刘超，liuchao@nao.cas.cn

等。由于创新的光学设计，CSST 可以达到约 1 $(^\circ)^2$ 的大视场 (field of view, FoV) 和高空间分辨率，其设计的动态点扩散函数 (point spread function, PSF) 80% 的能量集中度半径不大于 $0.15''$[1]。CSST 上最重要的仪器是主焦面上的巡天相机，它由 30 个 9 000 × 9 000 探测器组成。它将同时进行 NUV, u, g, r, i, z 和 y 波段的光度测量，以及 GU(255 ~ 420 nm)、GV(400 ~ 620 nm) 和 GI(620 ~ 1 000 nm) 波段的无缝光谱测量。在 300 s 曝光下，点源在 g 和 r 波段的极限星等将达到 26 mag。CSST 计划运行寿命至少为 10 a。在巡天期间，CSST 将覆盖 17 500 $(^\circ)^2$ 的区域。CSST 主要科学目标是宇宙学，但设计和巡天策略也满足对本星系群以及银河系中恒星进行天体测量。特别地，作为一种高分辨率的空间望远镜，CSST 在分离位于拥挤区域的单个恒星方面具有巨大的优势。因此，它可以极大地利用高精度照相测量在银河系核球区和附近可分解星系开展科学研究。

作为银河系中最密集的区域，银河系核球区的起源是一个巨大的谜团[2]。理论研究表明，核球区的盒子形状实际上是一根起源于盘的棒[3]。显然，恒星动力学在阐明核球区的起源方面起着至关重要的作用，因此，天体测量学研究是解决这一难题的关键。然而，由于恒星不均匀的高消光和极高的密度，核球区恒星的天体测量非常困难。直到 1992 年，Spaenhauer 等人[4] 以及后来的 Rich 和 Terndrup[5]都在 Baade 窗中获得红超巨星的可靠自行。Sumi 等人[6]利用光学引力透镜第二次实验 (Optical Gravitational Lensing Experiment II, OGLE-II) 中观测的 49 个银河系核球区星场，绘制出一个自行星表，星表的覆盖范围为 11 $(^\circ)^2$。之后，Vieira 等人[7]将 Sumi 在 Plaut 的低消光窗口内的研究扩展到$\mathrm{M_V}$星等 (约为 20.5 mag)，这些结果受到大气的影响，降低了自行精度。红外波段观测数据在高消光领域具有优势。Smith 等人[8] 介绍了 VVV 红外天体测量目录，其中包括 3.12 亿颗恒星，分布在 560 $(^\circ)^2$ 的银河系核球和南部银盘，其自行精度为 0.67 mas/a。然而，这些工作大多基于地面观测，而地面观测受到大气湍流的影响。因此，导出的自行精度受到相对大气视宁度的限制，而在密集的恒星场中，大气视宁度的影响会更大。

哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 利用高空间分辨率，显著提高了核球区自行测量精度。继 Anderson 和 King[9]开发的高精度天体测量方法之后，Kuijken 和 Rich[10]测量了位于 Baade 窗和人马座矮星系约 36 100 颗恒星的自行。这是第一次前景盘星通过其较大的平均自行与核球区分离，并为核球区旋转提供有力证据。Soto 等人[11]在其他三个低消光场中获得了额外的 15 000 颗星的高精度自行，达到了 0.9 mas/a 水平。Shahzamanian 等人[12]利用 HST 数据进行了进一步的深入研究，他发布了具有 7 年观测基线的 446 颗恒星的自行，这些恒星位于具有极大消光的银河系中心区域 ($A_V \leqslant 30$ mag)。

然而，由于视场较小，大多数使用 HST 的核球区观测仅限于几个低消光场和几个球状星团。虽然高空间分辨率有助于将星系识别为参考天体，但混叠的恒星会导致错误的分类，并降低参考架的准确性。因此，由于在密集和高消光场中缺乏额外的银河系参考天体，直接参考河外天体难以测定场星的绝对自行。

盖亚 (Gaia) 任务带来了天体测量学的新时代[13]。最新发布的数据是 EDR3，它提供了近 14.7 亿个亮于 G 波段 21 mag 的天体的高精度天体测量参数[14]。对于亮星(M_{G} <15 mag)，Gaia 测量的位置不确定度约为 0.01 ~ 0.03 mas，暗星 (M_{G} =20 mag) 约为 0.4 mas。亮星

和暗星的自行不确定分别为 0.02 ~ 0.03 mas 和0.5 ~ 0.6 mas。此外，Gaia 构建一个由类星体构成的名为 Gaia-CRF 的天体参考框架，其框架轴向指向的系统误差在 1 ~ 10 μas 之间，所有恒星的天体测量参数均是在此参考架中表征的。

然而，由于其空间分辨率的限制，Gaia 无法在像核球区这样拥挤的天区获得完整的观测。与此同时，高消光使许多核球区的恒星视星等变暗，超出了 Gaia 的探测极限。这为 CSST 提供了一个机会，用以改进银河系核球区中的天体测量学，因为它将在未来 10 a 中对核球区恒星提供更深入、更精确的自行测量。在本研究中，我们介绍了利用 CSST 在类似核球区的高密度天区进行自行测量的方法，并提出了提高自行精度的观测策略建议。我们还讨论了如何参考 Gaia 恒星处理 CSST 自行的工作。

本文第 2 章介绍了自行计算方法；第 3 章介绍了用于测试和验证该方法的模拟星表和图像；第 4 章评估自行方法的性能；第 5 章讨论参考架的选择和视差的影响；第 6 章进行简单的总结。

2 算　法

在处理望远镜直接观测的原始图像数据时，有很多步骤会影响自行解算。例如，星像定心误差、视场几何畸变和星等差等，这均会给自行引入系统差。

本文重点讨论两方面的问题：一个是根据一些定心算法来确定每颗恒星的准确位置；另一个是测量不同观测时间之间恒星位移，来估计出恒星的自行。对于 CSST 图像，第一方法是，首先精确测量每颗恒星的中心，然后将多次观测图像与参考对象定义的参考系对齐，来测量相对自行。最后，我们通过添加参考对象的平均自行，将相对自行转换为绝对自行。

图 1 总结了 CSST 在高密度场中推导自行的整个过程，其中背景由 SExtractor 计算，背景框的大小为 16×16 pixel[15]。假设每次观测的图像中噪声是随机的，我们将SExtractor 检测阈值设置为 0.1 ~ 1.0，将阈值数设置为 4 096，并关闭滤波，使 SExtractor 能够在非常拥挤的星场中检测尽可能多的恒星。在图 1 所示的过程中，点源位置的确定和自行的拟合是关键，将在下文进行描述。

2.1　点源定心

每个观测历元中恒星位置都会显著影响自行的准确性。在照相天体测量中，计算天体中心位置的常见方法是二维修正矩法和二维高斯拟合法。我们同时考虑了这两种方法，并比较了两种方法的性能，评估了其在计算自行时的影响，详见 4.1 节。

2.1.1　二维修正矩定心

我们采用二维修正矩定心法来计算物体的位置。减去背景后，SExtractor 根据阈值提取目标，然后利用修正矩得到天体中心，表示为：

$$X = \overline{x} = \frac{\sum p_i x_i}{\sum p_i} \quad , \tag{1}$$

其中，x_i 是目标源图像中像素的位置，p_i 是图像像素处背景上方记录的像素强度，单位为

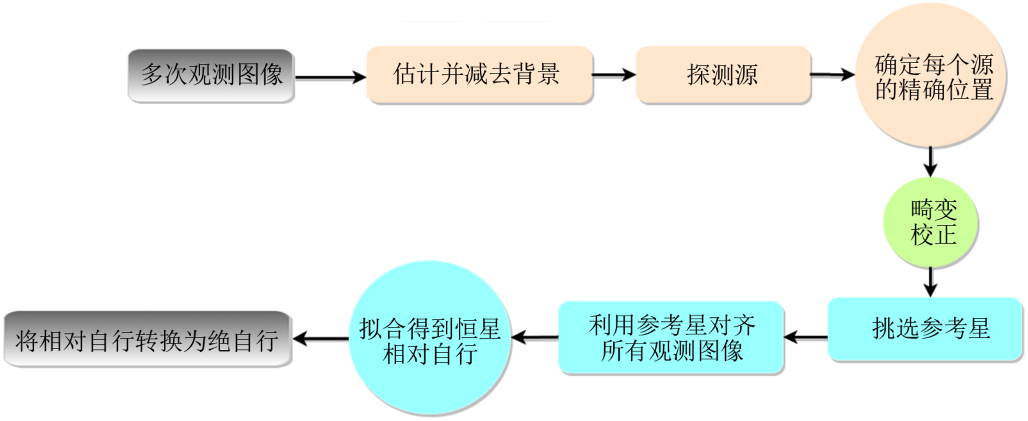


图 1　自行计算流程图

模数转换单元 (analog digital unit, ADU)。需要注意的是，此方法得到的中心位置受探测阈值和分割设置的影响。

2.1.2　二维 PSF 拟合定心

二维高斯函数拟合是在密集星场中获得高精度恒星位置的基本方法。基于恒星的输出参数 x, y, $x_{\rm min}$, $y_{\rm min}$, $x_{\rm max}$ 和 $y_{\rm max}$，本文使用 4 连通域方法，通过合理的阈值将图像转换为二值映射，以优化暗星的提取。在本研究中，我们不再使用高斯函数拟合，而是使用合适的 PSF (更多细节见 3.2 节) 在像素空间中拟合恒星轮廓。

光学模拟的原始 PSF 数据是一个矩阵。我们首先需要在图像像素中插值 PSF。在图像像素 x_i 上，以坐标 x_s 为中心的插值 PSF，$\phi^{'}$ 可以表示为：

$$\phi_i^{'}(x_s) = \sum_j h_s[x_j - \eta(x_i - x_s)]\phi_j \quad , \tag{2}$$

其中，ϕ 是表示 PSF 矩阵中的向量，x_j 是图像像素，η 是 PSF 采样步长与原始图像采样步长的比值 (过采样因子)，h_s 是插值函数，这里我们使用 Lanczos 插值，为：

$$h(x) = \begin{cases} 1 & (x = 0) \\ \mathrm{sinc}(x)\mathrm{sinc}(x/4) & (0 < |x| \leqslant 4) \\ 0 & (|x| > 4) \end{cases} \quad . \tag{3}$$

Lanczos 重采样用作低通滤波器，或用于在采样之间平滑插值数字信号。

根据最小化成本函数 E 拟合点源图像，可得：

$$E(\phi^{'}) = \sum_{i \in D_s} \frac{p_i - f_s\phi_i^{'}(x_s)}{\sigma_i^2} \quad , \tag{4}$$

其中，f_s 是点源 s 的积分通量，D_s 是围绕 s 设置的像素。第 i 个像素的方差 σ_i^2 有 3 个分

量，表示为：

$$\sigma_i^2 = \sigma_b^2 + \frac{p_i}{g} + (\alpha p_i)^2 \quad , \tag{5}$$

其中，σ_b^2 是局部背景的像素方差，p_i 如上所述，g 是望远镜增益 (e$^-$/ADU)。至于 α，除了高 p_i 值外，它通常可以忽略不计。α 因子解释了图像中的像素间不确定性、像素内响应函数的变化，以及由于抖动或有损图像重采样而导致的 PSF 的显著波动。

2.2 自行解算

对于 CSST 观测图像，参考星应具有高信噪比 (signal to noise ratio, SNR)、良好的轮廓、孤立并均匀分布在图像中。我们将多次观测图像对准由参考天体构成的参考系，然后校准每颗恒星在图像中的精确位置，并通过有效的方法拟合每颗恒星的自行。我们默认将第一次的观测图像作为参考框架。

恒星 (x_i') 在 t_i 历元的位置与自行和视差的关系如下[16]：

$$x_i' = x_\mathrm{I} + a(t_i - t_\mathrm{I}) + b \quad , \tag{6}$$

其中，a 是自行，b 与视差有关，x_I 和 t_I 分别是初始位置和初始时间。

我们使用 χ^2 来拟合自行，表达式如下：

$$\chi^2(a,b) = \sum_i^N \left(\frac{(x_i' - x_\mathrm{I}) - (a(t_i - t_\mathrm{I}) + b)}{\varepsilon_i} \right)^2 \quad , \tag{7}$$

令

$$x_i' = x_i - \Delta x_i \quad , \tag{8}$$

其中，x_i 是一颗星在 i 时刻的位置 (见 2.1 节)，Δx_i 是其他观测历元相对于第一次观测的参考星平均位移。式 (8) 将所有观测图像校准到同一参考框架下。

位置不确定性由两部分组成，表达式为：

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_c^2 + \varepsilon_t^2} \quad . \tag{9}$$

其中，ε_c 是确定恒星中心的误差，ε_t 描述如下：

$$\varepsilon_t = \left| \Delta x_\mathrm{ref} - \overline{\mu}_\mathrm{ref} \Delta t \right| \quad . \tag{10}$$

其中，Δx_ref 是指从图像中的第一个历元和其他历元开始测量参考对象的平均位移；$\overline{\mu}_\mathrm{ref}$ 是参考对象的平均自行，该量可从星表中得到。$\overline{\mu}_\mathrm{ref}$ 是参考物体自行和视差的结果，视差的影响将在 5.2 节中分析。

$$\mu_\mathrm{mem} = \left(\overline{\mu}_\mathrm{ref} + a \right) \pm \varepsilon_\mathrm{mem} \quad , \tag{11}$$

其中，$\overline{\mu}_\mathrm{ref}$ 是参考天体自行的平均值，a 是恒星的相对自行 (已在式 (6) 中提到)，而 ε_mem 是恒星自行中的误差，其中包含不同历元图像的对齐误差、视差的影响、恒星大小和颜色的偏差以及仪器特征。

3　模拟数据生成

根据 CSST 的性能，我们模拟了高精度和高质量的图像，来测试我们的方法。在本章中，我们将介绍生成模拟图像的过程，并说明模拟图像具有足够精确的位置精度能够在其上测试非常高精度的自行。

3.1　模拟星表

作为生成模拟图像时的输入，模拟星表由模拟恒星的天体位置、亮度、自行和视差组成。通过恒星在天球上位置的天体测量校正，我们可以生成不同观测时间的模拟恒星的模拟观测位置。我们使用 Galaxia，一个生成合成数据集的便捷程序，模拟了银河系较大范围的恒星，在给定的颜色-星等界限、空间大小和面积等输入参数后返回模拟星表[17]。我们模拟的银河系核球区方向的输入星表 (其星等分布如图 2 所示)，覆盖了一个 CSST 探测器大小的天空区域，即 $11.3'\times11.3'$。它包含大约 540 万颗恒星，包括前景星、核球区部分的成员星和背景星。在 g 波段，极限星等设为 26 mag，天区中心位于黄道坐标 (266°, 5°)。最后，在模拟的多次观测的恒星位置上加入自行和视差这两个天测效应。这些天测效应根据国际天文学联合会 (International Astronomical Union, IAU) 推荐的计算方案得到。

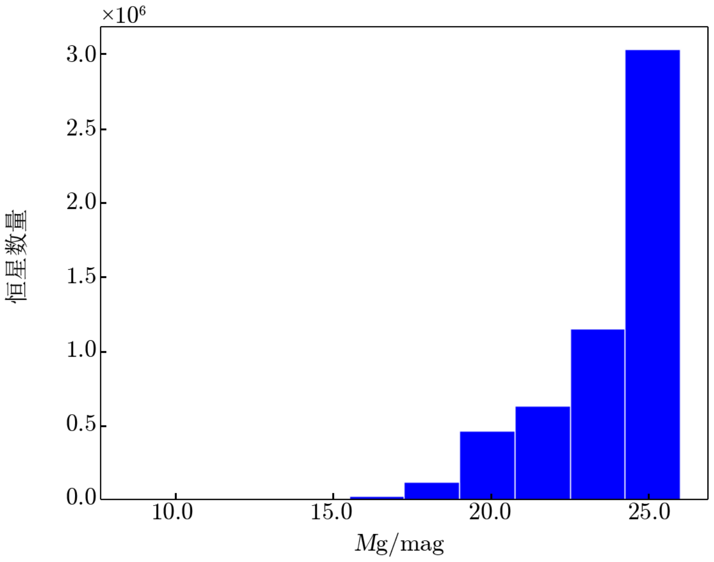


图 2　模拟 CSST 观测核球区处恒星的星等直方图

3.2　模拟图像

我们通过卷积 PSF 得到点源并添加观测和仪器效应来生成模拟图像。为了确保模拟接近实际观测，CSST 的 PSF 模拟分为静态 PSF 模拟和动态 PSF 模拟。静态 PSF 模拟基于望远镜的光学设计模型。考虑到镜子的研磨、抛光和加工误差，望远镜的安装和调整误差，CCD 表面不平度误差，重力变形和热变形误差等，动态 PSF 模拟还考虑了微振动和精密稳

像残差两项动态误差。同时我们采用了一种经典的插值算法：逆距离加权 (inverse distance weighted, IDW)[18]，以获得目标位置周围精确的插值 PSF。但是，我们的 PSF 只是针对单个波段 (g 波段) 的模拟，并没有把实际观测中所有可能的问题考虑进去，所以模拟的 PSF 与实际的观测情况会有一定差距。图 3 显示了模拟的 PSF 分布。

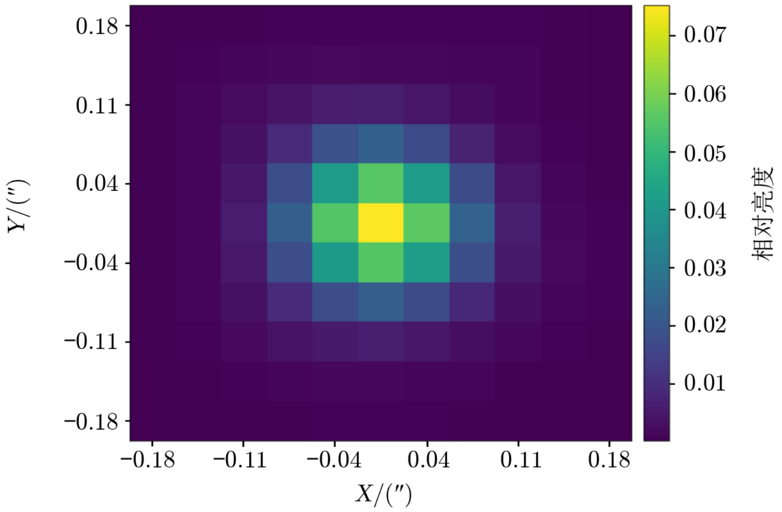


图 3 模拟的 PSF

表 1 CSST 一个芯片的模拟图像的基本信息

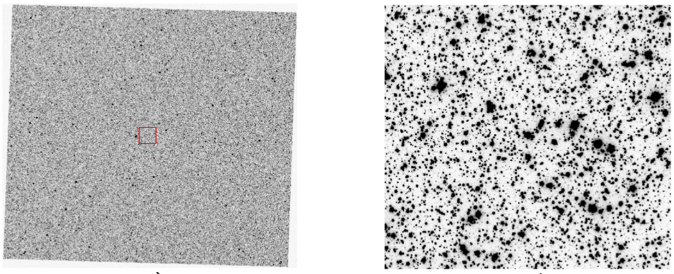
参数	数值
增益	1.1 e^-/ADU
像素尺寸	0.074(″)/pixel
PSF $R_{\rm EE80}$	0.11″
视场	12′×12′
暗流	0.02 e^-/s
读出噪声	5.0 e^-/pixel
曝光时间	100 s

模拟图像由 Galsim 根据输入星表进行模拟。Galsim 是一个基于 python 的函数包，利用各种方式生成多用途天体的模拟图像[19]。我们根据 CSST 仪器参数设置 Galsim 参数，其中模拟恒星的 SNR 在 25.5 mag 时约为 5，曝光时间为 100 s，暗电流为 0.02 e^-/s，读出噪声为 5.0 e^-/pixel，增益为 1.1 e^-/ADU[1]。表 1 列出了这些参数的详细信息。为了使模拟图像更真实，在图像处理过程中根据 HST 的平场和本底图像信息添加噪声，包括平均值为 0.0，方差为 4.0 的高斯噪声作为减去本底后留下的噪声，以及平均值为 1.0 且方差为 0.05 的高斯噪声作为除平场后留下的噪声。

我们将模拟星表中最小的赤经 (right ascension, RA) 和赤纬 (declination, Dec) 作为图像的起点，之后根据 CSST 的像素尺寸 ($0.074'' \times 0.074''$ pixel^{-1})，将模拟星表中源的 RA 和 Dec 转换到 CSST 主焦面标度的理想坐标系，类似于文献 [20] 的理想坐标系，但是我们没有使用很严格的映射关系，而是取了近似。

模拟图像由单个恒星的子图像和背景噪声构成，这些子图像是通过将模拟的 PSF 与位于恒星位置的 delta 函数进行卷积而生成的。在现阶段，为了简单起见，我们不涉及图像畸变。模拟图像如图 4 所示，图 4 b) 为放大的中心区域。

我们生成了一张额外的参考图像，用于验证 Galsim 添加单个恒星的过程是否会导致位



a)　　b)

注：a) 对应于 CSST♯8 芯片在 g 波段的观测图像，b) 黑色点表示恒星。

图 4　模拟图像

置误差，该误差对自行估计的准确性具有严格限制。参考图像不包含任何背景和噪声。在参考图像中添加的模拟星都是单星。我们在参考图像中挑选了 100 颗恒星，并确定它们的位置。位置偏移是通过与输入星表中恒星真实位置进行比较得到的。我们发现，图像模拟算法的定位精度约为 0.1 mas (约 0.001 5 pixel)，比恒星定心的预期误差小一个数量级。因此，Galsim 定位的不确定性不会影响自行解算的性能。

4　自行方法性能测试

性能测试的目的，首先是确认本文方法在高密度天空区域处理自行数据的可行性和准确性；第二，揭示自行与其他相关因素之间的关系，如视差对自行的影响；最后，该测试可对 CSST 针对银河系核球区的观测提供意见，来提高自行解算精度。需要注意的是，该评估仅限于模拟数据，不包括场畸变，而且仅针对一个探测器的数据。

性能评估不需要处理整幅图像，我们选择了一个区域子图像，中心 (5 801, 5 027)，大小为 $1\,000 \times 1\,000$ 作为测试区域。这不仅节省了大量的计算时间，还避免了一些复杂的处理，例如将重叠在一起的源分开，让我们的着重点在自行相关的计算上。我们选择 $18 \sim 24$ mag 之间的恒星，每个星等范围内的恒星数如表 2 所示。恒星的数量足够大，就可以获得统计结果。图 5 显示了 SExtractor 对模拟数据的检测能力。当星等暗于 23 mag 时，SExtractor 的完备性迅速下降；这表明 SExtractor 的探测能力在过于密集的星场中受到了影响。

表 2　测试样本中每个星等范围内的分布数量

算法	星等范围/mag					
	18～19	19～20	20～21	21～22	22～23	23～24
定心	786	1 899	2 106	2 098	2 184	2 390
自行 (模式 1)	755	1 777	1 949	1 868	1 892	1 826
自行 (模式 2)	716	1 671	1 774	1 672	1 545	1 105
自行 (模式 3)	732	1 704	1 842	1 730	1 605	1 188

注：模式 1、模式 2 和模式 3 是 4.2 节中提到的核球区观测模式。

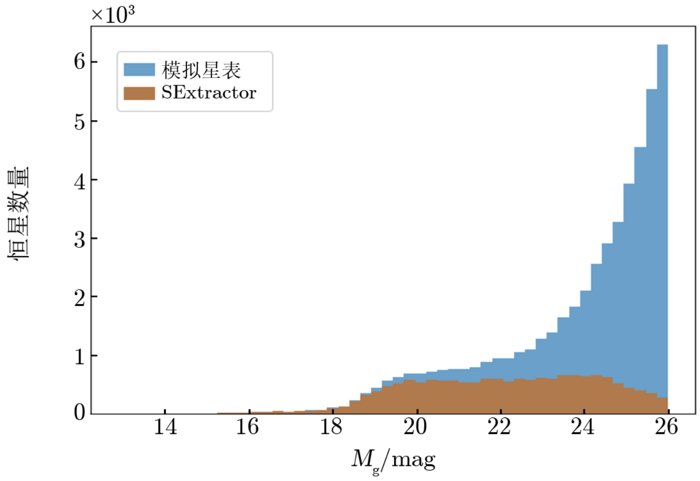
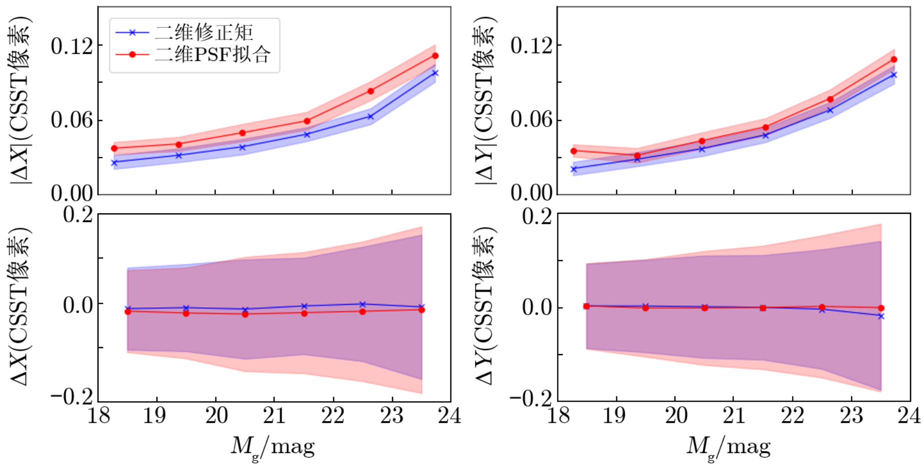


图 5　不同星等下比较 SExtractor 探测到的恒星数量与模拟星表中的恒星数量

4.1　定心算法测试

图 6 给出 g 波段的星等与二维修正矩和 PSF 拟合定心算法的残差关系，我们将数据根据星等分组，间隔为 1 mag。从中可以看出绝对误差的趋势，即精度 (precision)，其 X 和 Y 方向上的趋势为图 6 的上部分。两种方法的精度差异约为 0.01 pixel。由于 CSST 图像存在一定程度欠采样问题，以及本研究在 PSF 拟合方法中使用的 PSF 是 3.2 节中提到的模板 PSF，而不是经验PSF，二维 PSF 拟合方法略低于二维修正矩法。但此差异统计上不显著。



注：顶部图显示绝对误差与星等关系，浅红色范围是每个星等组中二维 PSF 拟合的随机误差中值的不确定性，浅蓝色范围是每个星等组中二维修正矩拟合的随机误差中值的不确定性。底部图显示残差与星等关系，浅红色范围是不同星等的二维 PSF 定心误差的 1σ 弥散，浅蓝色范围是二维修正矩定心误差的弥散。

图 6　二维修正矩和 PSF 拟合算法在 X 和 Y 方向的比较

在样本 g 星等范围的中位数为 21 mag 时，CSST 定心精度约为 0.04 pixel (约为 0.003″)，在不考虑畸变的情况下，两种方法在 X 和 Y 方向上没有差异，并且 Y 方向的定心精度都比 X 方向稍好一些 (差异小于 0.01 pixel)，这可能与 Galsim 生成图像的定位精度有关。将图像的 X 轴与 Y 轴对调再进行一次定心则可以解决这一问题。虽然两种定心方法性能相似，但这两种方法的精度方面都有很大的弥散，这与过于严苛的星场条件密不可分。

4.2　与不同观测策略相关的自行性能

在高密度场中，很难找到或识别银河系外的参考物体，这将在第 5.1 节中讨论。考虑到核球区中的高密度和高消光，天文学家很难获得足够多的河外星体作为传统的天体测量框架来测量绝对自行。因此，我们的解决方案是引入 Gaia 星表，并使用具有高天体测量精度参数的 Gaia 恒星作为框架来解算恒星绝对自行。

由于模拟星表不能与 Gaia 交叉匹配，我们随机选择 14 个均匀分布的恒星替代参考源，并在校正模拟星表中的自行参数时采用 Gaia 同级别误差，以模拟 Gaia 性能。我们考虑了 Gaia EDR3 中 G 波段的中值自行误差 (见表 3)，其星等从 18 ~ 21 mag，中心位置为 $\alpha_{\rm RA}$=265.47°, $\delta_{\rm Dec}$=−28.38°，视场大小为 12′×12′。然后，计算自行误差分布，并将误差添加到随机选择的参考星的理论自行中。

表 3　Gaia EDR3 自行误差的中值

星等 /mag	恒星数量	$\sigma_{\mu_{\alpha^*}}$ /mas·a^{-1}	σ_{μ_δ} /mas·a^{-1}
18 ~ 19	311	0.203	0.159
19 ~ 20	627	0.416	0.321
20 ~ 21	764	0.938	0.742

注：$\sigma_{\mu_{\alpha^*}}$ 表示 RA 方向自行标准误差的中值，σ_{μ_δ} 表示 Dec 方向的自行标准误差的中值。

CSST 自行精度与观测策略密切相关。为了估计这种关系，我们在 CSST 在轨运行的 10 a 中测试了三种核球区观测模式，结果如下。

模式 1：CSST 在第一年和最后一年分别观测一次，基线为 10 a。它具有较高随机测量误差但是时间开销最低。

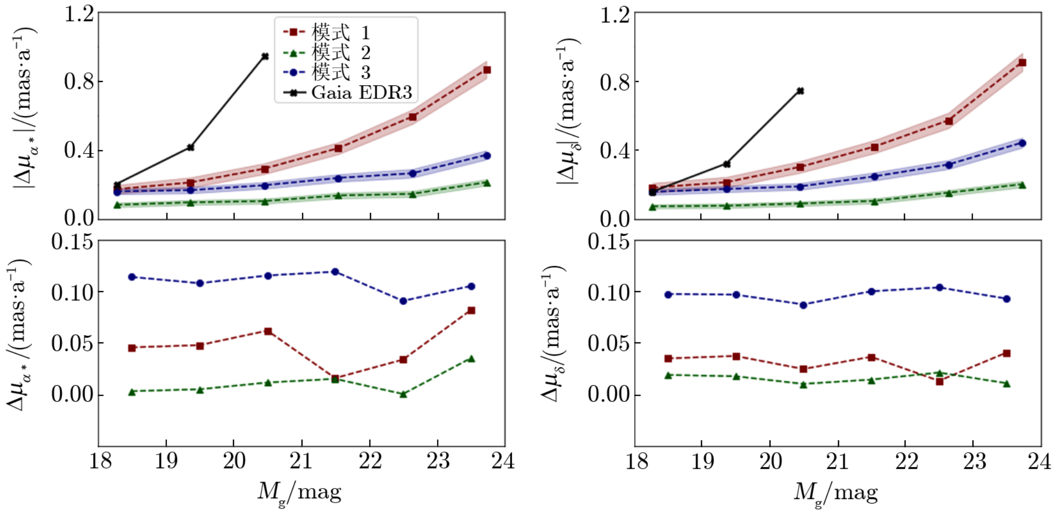
模式 2：CSST 每年以相同的时间间隔观测。不受视差影响，但实现代价高。

模式 3：CSST 观察核球区 10 次，包括第一年 7 或 8 次，第 5 年 1 次，最后 1 年 1 次。

在图 7 中，我们对每种模式的精度 (随机误差，precision) 和准度 (系统误差，accuracy) 进行了比较，并添加了 Gaia 的 G 波段① 18 ~ 21 mag 之间的自行精度，以进行近似比较。显然，由于信噪比高，我们推导的 CSST 自行在 18 ~ 19 mag 时与 Gaia 相当，在 20 ~ 21 mag 时，比 Gaia 更好。各观测模式的精度随星等增大呈缓慢下降趋势。在 10 a 在轨时间内有 10 次相同的时间间隔的观测，即模式 2 的性能更好。模式 2 的下降趋势是渐进的，随机误差的中位数在所有模式中都是最低的，约为 0.1 mas·a^{-1}。与模式 2 相比，在相同的观测基线和相同的观测次数下，模式 3 的自行残差比模式 2 更显著。两种模式之间的差异随着星等的增大而增大，差约为 0.1 mas·a^{-1}。RA 方向的自行精度比 Dec 方向稍差，因为在 Gaia EDR3 中，恒星的 RA 方向的误差大于 Dec 方向的误差 (见表 3)。表 4 列出了每种

①Gaia 的 G 波段与 CSST 的 g 波段不同，Gaia 的 G 波段波长覆盖范围为 350 ~ 1 050 nm，CSST 的 g 波段为 401 ~ 547 nm。

模式的系统误差和随机误差。在实际观测中，由于一些其他因素的影响，如望远镜上的雾气，会让天体在 CCD 上的采样变多，所以在未来 CSST 真实观测图像中天体欠采样的情况没有模拟图像中那么严重，从而对定心和自行拟合的结果精度都有一定提高。



注：顶部图像显示随机误差与星等关系，底部图像显示系统误差与星等关系。浅色的范围是相应观测模式的误差弥散。由于缺少相关数据，底部图中未提供 Gaia EDR3 准确度。

图 7 比较不同观测策略和 Gaia EDR3 在 RA 和 Dec 方向的自行误差

表 4 不同观测策略下的自行误差的中值 $\mathrm{mas\cdot a^{-1}}$

观测策略	$\Delta\mu_{\alpha*}$	$\Delta\mu_{\delta}$	$\lvert\Delta\mu_{\alpha*}\rvert$	$\lvert\Delta\mu_{\delta}\rvert$
模式 1	0.046	0.030	0.375	0.382
模式 2	0.009	0.016	0.121	0.103
模式 3	0.111	0.095	0.213	0.225

注：$\Delta\mu$ 表示系统误差，$|\Delta\mu|$ 表示随机误差。

由图 8 可以看出，在观测少于六次时，自行精度与观测时间呈线性关系，在 RA 和 Dec 方向的精度为 0.4 ~ 0.2 mas/a。当观测次数超过六次，自行精度变化趋于稳定，Dec 方向略低，这是因为用于对齐不同历元的参考星带有 Gaia EDR3 误差 (见表 3)。随着观测次数的增加，该误差的影响越显著。

此外，图 9 显示，过多的观测可能会失去许多暗弱的恒星 ($M_g \leqslant 22$ mag)。这是因为图像中的噪声，例如读出噪声，在每个历元中都是随机的，无论是在观测图像中还是在模拟图像中，暗弱恒星的探测都受到噪声的强烈影响，不会在每次观测中都能有效探测到。因此，在 CSST 观测能力确保高水平的自行精度条件下，对该密集星场进行等间隔的六次观测是最佳观测策略。未来也可以通过强制测光提高暗星测量完备度。

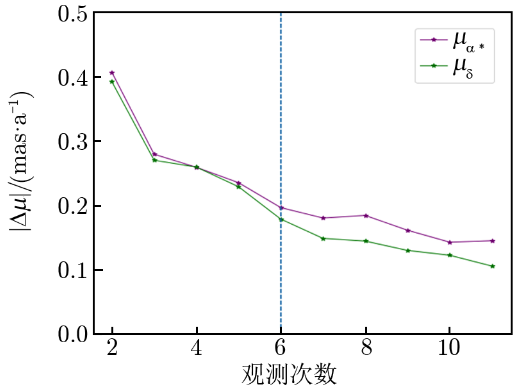


图 8　自行精度随观测次数的变化图

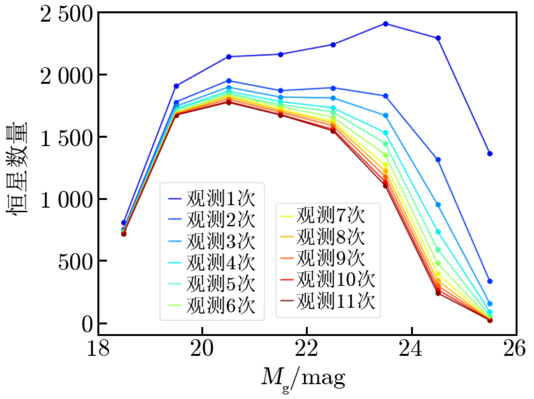


图 9　对齐不同观测次数后的恒星数与星等关系

5　讨　论

5.1　密集星场中的参考天体

在切平面理想坐标系下，使用河外物体直接或间接地导出目标的绝对自行有两种基本方法。直接方法是通过河外天体将多个观测周期归一化为同一位置系统，并导出绝对自行。间接方法是通过恒星将多个观测周期归一化为同一位置系统，给出目标的相对自行，然后通过减去共动的河外天体，将相对自行转换为绝对自行。其基本假设是，具有相似星等和颜色的不同物体 (恒星、星系等) 具有近似的系统差异，而河外物体 (星系、类星体等) 的绝对自行接近于零[21]。

类星体由于其类似恒星的外观和发光性质[22, 23]，可以作为银河系外天体的优质参考源，在高精度自行推导中用作参考，如 Gaia[14, 24]。类星体应该提前进行光谱认证，并且随着许多高效的大天区巡天，例如斯隆巡天 (The Sloan Digital Sky Survey, SDSS)[25]、大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜 (The Large Sky Aera Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)[26]，类星体的数量迅速增加。基于百万类星体 (Milliquas) 星表，我们在标准坐标系下模拟了类星体在观测天空中的分布数量。我们将天空区域划分为 $12'\times12'$ 区域，并计算了不同类星体数的区域。全天的 71.07% 和低银纬高度 ($|b|\leqslant10^\circ$) 的 97.99% 的区域没有类星体 (见表 5)。整体调整可能会缓解高银纬区域的情况，但在低银纬处缺乏类星体是解算自行的一大障碍。

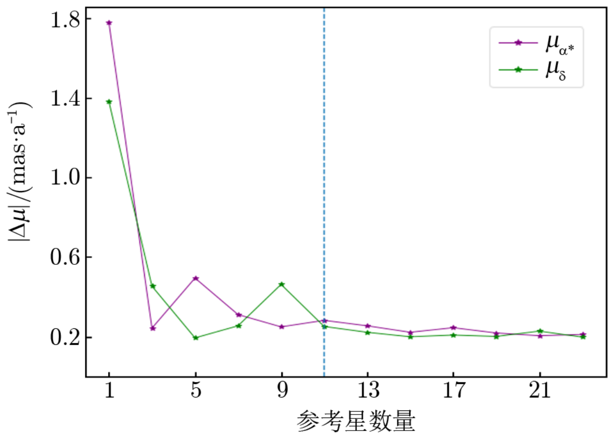
表 5　在 CSST 单探测器天区中类星体数量　(%)

区域	类星体数量百分比						
	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n\geqslant6$
全天	71.07	14.73	6.52	3.63	2.01	1.05	0.99
$\|b\|\leqslant10^\circ$	97.99	1.84	0.13	0.02	0.007	0.003	0.01

注：b 是银纬；n 是类星体数量。

背景星系是类星体的合理补充，类星体相对丰富，均匀分布在天空中。它们可以通过颜色[27] 和空间分布特征来选择，这在许多自行星表中被广泛使用。此外，空间望远镜的高空间分辨率可以将星系与恒星区分开来，因此大量星系在 HST 巡天中被找到。然而，在核球区处使用星系作为参考是很困难的。与类星体的情况类似，星系的密度是有限的。与此同时，星系在核球区的错误分类可能会严重影响恒星的去混合和消光。

综上所述，我们只能采用具有绝对自行的恒星作为参考，最新版本的 Gaia 星表提供了这种恒星。例如，Gaia-EDR3，它的 J2016.0 (质心坐标时，Barycentric Coordinate Time, TCB) 与国际天球参考系(International Celestial Reference Frame, ICRF) 的旋转速度的均方根值约为 0.01 mas·a^{-1}[24]。为了评估参考 Gaia 星表确定自行精度的效果，我们选择了几个均匀分布在 18 ~ 21 mag 之间的目标星作为参考星，并根据输入星表计算恒星自行的残差。从图 10 可以看出，当参考星数大于 10 时，自行残差的绝对值变得稳定。



注：深蓝色虚线是曲线不再发生变化的边界线。

图 10　参考星的数量与自行精度的关系

5.2　视差对自行的影响

根据文献 [16] 中的公式 (21.3)，恒星运动可以描述为：

$$b = P\varpi + o \quad , \tag{12}$$

其中，b 是与式 (6) 中的视差相关的常数项，ϖ 是视差，o 是难以分辨的微小残差，P 是从美国 DE 系列星历中获得的视差因子。DE 历表是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 为深空导航和星际探索开发的一系列太阳系天体历表[28]。从太阳系天体历表获得视差因子 (p) 后，球坐标 (α, δ) 应使用以下公式转换为标准坐标 (ξ, η)：

$$\xi = \frac{\cos\delta \sin(\alpha - A)}{\cos\theta} \quad , \tag{13}$$

$$\eta = \frac{\sin\delta\cos D - \cos\delta\sin D\cos(\alpha - A)}{\cos\theta} \quad , \tag{14}$$

其中，(A, D) 是赤道坐标，$\cos\theta$ 为：

$$\cos\theta = \sin\delta\sin D + \cos\delta\cos D\cos(\alpha - A) \quad . \tag{15}$$

在获得核球区中恒星视差分布后，结合式 (12), (13), (14)，可以测量恒星视差对解算自行的影响。然而，由于参考星与目标之间的视差很近，减轻了这种影响。当使用河外天体作为参考物体来计算绝对自行时，应该适当地处理视差带来的影响。

为了估计视差在自行解算中的影响，我们进行了一项测试：假设 CSST 观测一颗距离太阳系约为 8 kpc ($1/\varpi$) 的恒星，具有切向速度 $V_{\rm t}$，则可以从式 (16) 推导出其理论自行值 ($\mu_{\rm T}$)。然后，在 10 a 的观测中，它在天空中的运动与时间跨度有关，如图 11 中的蓝色直线所示。除了自行，视差还会影响恒星的视运动，红色误差条代表视差的最大影响。观测到的理想恒星视运动，包括自行和视差共同影响，在图 11 中的绿色曲线表示。我们用式 (17) 来计算视差影响的自行偏差与真实自行的比率 (R)。假设两种观测策略：节省时间开销优先级和自行精度优先级。

$$\mu_{\rm T} = \frac{V_{\rm t}\varpi}{4.74} \quad , \tag{16}$$

$$R = \frac{\mu_{\rm T} - \mu_{\rm Obs}}{\mu_{\rm True}} \quad . \tag{17}$$

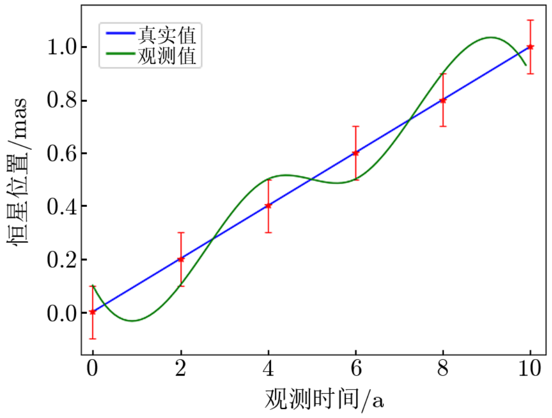


图 11　视差对自行解算的影响示意图

对于第一种策略，我们将观测次数限制在最低值 2 次，并改变观测时间基线，以获得不同恒星切向速度下的不同 R，结果见表 6。对于第二种策略，我们将时间基线设置为 CSST 在轨时间：10 a，并改变观测次数，以获得不同恒星切向速度下的不同 R，结果见表 7。由此可以推断恒星的切向速度、观测的时间基线和观测次数与视差对自行的影响显著成反比。切向速度越大，观测时间基线越长，观测次数越多，视差对计算自行的影响越小，这与图 9 的结果一致。

表 6 不同观测时间基线下视差对不同速度恒星自运动测量的影响

速度 /km·s^{-1}	R				
	$t=5$ a	$t=10$ a	$t=15$ a	$t=20$ a	$t=25$ a
10	0.237	0.105	0.068	0.050	0.040
50	0.047	0.021	0.014	0.010	0.008
100	0.024	0.010	0.007	0.005	0.004
150	0.016	0.007	0.005	0.003	0.003

注：t 表示时间基线。

表 7 10 a 时间内不同观测次数下视差对不同速度恒星的自行测量的影响

速度 /km·s^{-1}	R			
	$c=2$	$c=4$	$c=10$	$c=20$
10	0.105	0.063	0.029	0.014
50	0.021	0.013	0.006	0.003
100	0.010	0.006	0.003	0.002
150	0.007	0.004	0.002	0.001

注：c 表示观测次数。

6 总 结

我们讨论了高精度测量银河系核球区自行的方法，并使用模拟图像中 18 ~ 24 mag 范围内约 10 000 颗恒星测试了我们方法的效果。同时，我们比较了两种确定恒星中心位置的方法，包括二维修正矩法和二维 PSF 拟合法的性能，两种方法在不同的星等下的定心结果相似 (相差约 0.01 pixel)，且都被高密度的星场条件所影响。以具有高精度天体测量精度的 Gaia 恒星为参考，可以在高消光和高密度场中获得单颗恒星为 0.2 mas/a 的绝对自行精度。我们介绍了 CSST 的模拟数据和确定点源的方法。根据模拟图像的结果可得，CSST 对核球区进行 6 次及 6 次以上的观测将获得高精度的自行结果 (约 0.2 mas/a)，并且视差对自行的偏差影响可以通过观测策略来降低。

参考文献：

[1] Zhan H. ChSBu, 2021, 66: 1290
[2] Bland-Hawthorn J, Gerhard O. ARA&A, 2016, 54: 529
[3] Shen J, Rich R M, Kormendy J, et al. ApJ, 2010, 720: L72
[4] Spaenhauer A, Jones B F, Whitford A E. AJ, 1992, 103: 297
[5] Rich R M, Terndrup D. ASPC, 1997, 127: 129
[6] Sumi T, Wu X, Udalski A, et al. MNRAS, 2004, 348(4): 1439
[7] Vieira K, Casetti-Dinescu D I, Mendez R A, et al. AJ, 2007, 134: 1432

[8] Smith L C, Lucas P W, Kurtev R, et al. MNRAS, 2018, 474: 1826
[9] Anderson J, King I R. AJ, 2003, 126: 772
[10] kuijken K, Rich R M. AJ, 2002, 124(4): 2054
[11] Soto M, Zeballos H, Kuijken K, et al. A&A, 2014, 562: A41
[12] Shahzamanian B, Schodel R, Nogueras-Lara F, et al. A&A, 2019, 632: A116
[13] Lindegren L, Klioner S A, Hernandez J, et al. A&A, 2021, 649: A2
[14] Collaboration G, Brown A G A, Vallenari A, et al. A&A, 2021a, 649: A1
[15] Bertin E, Arnouts S. A&AS, 1996, 117: 393
[16] van Altena W F. Astrometry for Astrophysics. New York: Cambridge University Press, 2013: 3
[17] Sharma S, Bland-Hawthorn J, Johnston K V, et al. AJ, 2011, 730(1): 3
[18] Gentile M, Courbin F, Meylan G. A&A, 2013, 549: A1
[19] Rowe B T P, Jarvis M, Mandelbaum R, et al. Astronomy and Computing, 2015, 10: 121
[20] Dick W R. AN, 1991, 312: 113
[21] Qi Z X, Yu Y, Bucciarelli B, et al. AJ, 2015, 150: 37
[22] Kallivayalil N, van der Marel R P, Alcock C. AJ, 2006, 652: 1213
[23] Piatek S, Pryor C, Olszewski E W, et al. AJ, 2002, 124: 3198
[24] Collaboration G, Klioner S A, Mignard F, et al. A&A, 2021b, 649: A9
[25] Lyke B W, Higley A N, McLane J N, et al. ApJS, 2020, 250: 8
[26] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 1197
[27] Vickers J J, Roser S, Grebel E K. AJ, 2016, 151: 99
[28] Deng X M, Fan M, Xie Y. AcASn, 2013, 54: 550

Stellar Proper Motion Study of Crowded Stellar Field of CSST

NIE Jia-lu[1,2], CAO Zi-huang[1,2], LIU Chao[2,3], TIAN Hai-jun[4], TIAN Hao[3], ZHANG Xin[3], WEI Chen-liang[5], LI Xiao-bo[6,7], BAN Zhang[6,7], ZHAO Yong-heng[1,2]

(1. Key Laboratory for Optical Astronomy, National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Joint Science Center for China Space Station Telescope, National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 4. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 5. Key Laboratory of Galaxy Cosmology and Astronomical Big Data Techniques, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China; 6. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 7. CAS key Laboratory of On-orbit Manufacturing and Integration for Space Optics System, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The stellar absolute proper motion of crowded field is an important problem of astrometry. The space-based observation could get high spatially revolved images in the crowded field. The China Space Station Telescope (CSST) can provide high precision absolute proper motion that significantly improve the performance of HST and Gaia in the

sky area and deepness of observation. The Galactic bulge, as it is of importance in galactic science and is difficult to process, was selected as a sample of the high-density area to test our method and CSST observation performances. We simulated the CSST observed image and implement our test on it. Two centering methods are conducted, and the precision of centering is about 0.03 to 0.08 pixels depending on the magnitude. The absolute proper motion was measured under different observation strategies in the 10 a baseline. After comparison, we find that equal interval observation is the best choice. We then conclude that six observations can obtain the precision of proper motion is better than 0.2 mas/a between 18 $\sim$ 24 mag. Finally, we estimate the effect of parallax in the proper motion estimation under the different time baselines and stellar velocities.

Key words: crowded star field; space astronomical observation; galaxy; proper motion